

機械学習を用いた実際の解体工事振動波形からの 部材転倒兆候の検知の試み

○藤本 郷史*¹

キーワード：解体工事 モニタリング ディープラーニング 異常検知

1. はじめに

多くの産業分野のなかで建設分野は最も労働災害の多いことが広く知られている¹⁾。この労働災害死傷者数は、建設分野全体としては長期的に減少傾向にある²⁾が、解体工事に限れば減少傾向に無いことが指摘されている。建設労働安全衛生年鑑の「重大災害事例」によっても、解体工事に関係する災害件数は、400件(H1～H25)近くにのぼっている。すなわち、解体工事分野では、これまでの対策技術に加えて、新たな労働災害防止技術開発の必要性が高いといえる。

建設労働安全年鑑の分類によると、建設分野の労働災害では、「崩落・倒壊」に分類される事故が25%以上を占めており、作業員等の「墜落・落下」に次いで件数が多い²⁾。例えば、建築物外周壁の重機転倒工法の事故が複数報告されており、壁柱脚部のはつり作業中に外周壁の強度を見誤る、あるいは、重機が誤って触れてしまうなどによって、(転倒作業中の)部材が予期せず建物外部側に転倒し、災害に至っている。この種の事故は、作業に従事している作業員だけでなく、一般公衆にまで死傷者が発生する点で特に重大である。例えば、平成15年の事故事例では、6名が死傷し、国土交通省がガイドライン³⁾をまとめるに至っている。本報では、この例に代表される重機転倒作業の安全性に着目している。

意図しない部材の外部への転倒を避けるために、各種の指針・文献^{4,5)}では、引きワイヤの設置等いくつかの項目が挙げられているが、これらの予防的な施工上の配慮に加えて、危険が生じそうな箇所・時点における「警報」があれば、さらなる安全性の向上が期待できる。すなわち、「意図しない転倒の兆候」を何らかの計測を通じて検出し、作

業者等へ通知できれば安全性の向上につながると考えられる。

他方で、国内外の労働安全にかかわる研究動向をみると、近年安価になってきたセンシング技術を活用して労働安全性・公衆安全性を高めようとする研究事例が数多くみられる。著者らも、これまでに解体工事の労働安全・公衆安全に向けた各種センシング技術開発を行ってきており、特に、本報が対象とする部材転倒作業についても、文献6に報告しており、本報は続報にあたる。すなわち、文献6では、実際の解体工事の分析に基づいて、部材の傾斜を検知することが意図しない部材の外部への転倒兆候を検知する観点から有用であろうと報告したが、一方で、解体工事にみられるような極めて大きな加速度環境下では、必ずしも正確に部材傾斜角を算定・補正できないこともあり、課題が残るとしていた。そこで、本報では、このような課題解決のために、センサ計測値の単なる補正によらず、機械学習(ディープラーニング)による全く異なるアプローチで、部材の転倒兆候を検知できないか試みたものである。

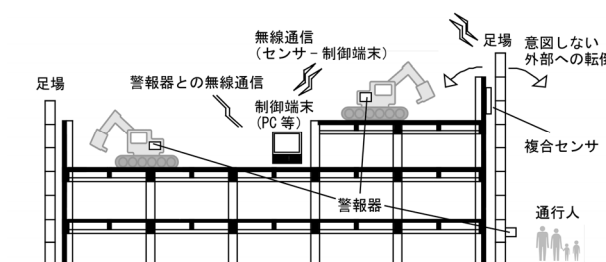


図1 解体工事の部材転倒作業モニタリングシステムの概要(文献6で提案)

表1 解体工事における重大な労働災害の例

No.	年	災害の状況	災害種*
2	H12	鉄骨鉄筋コンクリート造(地上7階、地下2階)のボーリング場の解体作業中、一(中略)被災者が、一階床上のガレキの過積載により一階スラブが崩壊(縦25m 横21m)しガレキの下敷きになった。	倒壊
3	H15	ビル解体工事現場において、5階外壁解体作業中に建物南側外壁及び鉄骨梁、柱の一部が外部足場とともに約15m下の道路に崩落した。(以下略) ※作業員2名死亡、信号待ちの自動車内の2名死亡、2名負傷	倒壊
5	H21	ドラグ・シャベルのバケットをフォーククラブ(掴み爪型)に付け替えたもので半地下式の駐車場の外壁部分を取り壊していた作業場所に被災者が立ち入り、倒れてきた壁の下敷きになった。	倒壊
6	H21	建物解体(RC造、一部4階建)工事現場において、3階壁部分をハンドブレイカで縁切中、壁が倒壊し下敷きになった。	倒壊

※分類は建設業安全衛生年鑑による。

2. 本報告で分析対象とした実際の解体工事

表－2、表－3および図－3に本報が対象とした建築解体工事の実測の概要および計測の様子を示す。

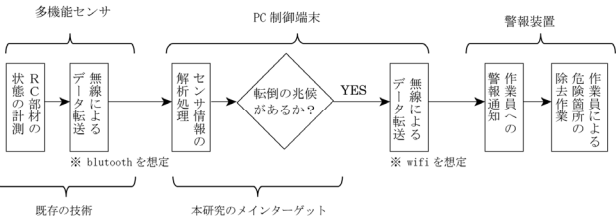
本報で対象とした計測データは、MEMS 式の複合センサによって計測された時系列データであり、文献 6 に報告した工事と同一である。対象建築物は、鉄筋コンクリート造であり、狭隘な都市部に立地しているため、階上解体工法によって解体された。通常、階上解体工事における転倒作業は、柱 2 本程度を含む 1-2 スパン程度を一度に引き倒す。この作業は、当該工事でも繰り返し行われたので、複数の階・スパンにわたって、転倒作業を計測した。

なお、計測自体は文献 7 と同一であるが、分析にあたっては、本報で用いたセンサは 3 軸であり、文献 6 の手法では用いなかった方向も機械学習データとして用いた。

3. 本報の検討範囲

図－2に本報で想定するモニタリングシステムのデータ処理フローの概要を示す。本報では、ここに示す処理フローのうち、PC 等の制御端末における異常検知（部材の転倒の兆候を判定する処理）を開発対象とした。

開発対象としていない箇所、すなわち、センサによる計測、無線通信によるデータの転送、警報の発信などは既存技術で実用レベルにあると認識している。



図－2 本報開発の対象

表－4 解体工事の転倒作業モニタリングに要求される条件（文献 7 より転載）

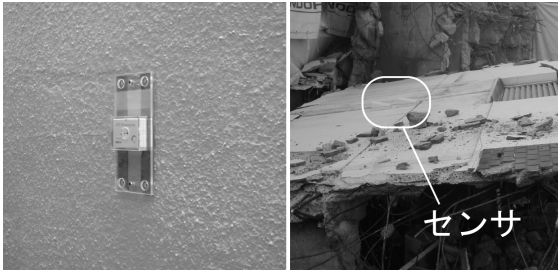
記号	制約条件と要求性能の分類	概要
R-1	システムの逐次的な変化	転倒（を予定する）部材を一つのシステム（系）として、システム同定を行おうとすると、以下のような変化が生じることによってシステム自体が変化することになり、同定が難しい。 ・剛性（断面の残存コンクリや鉄筋断面や塑性化の有無、両サイドの鉄筋物性） ・減衰係数（断面の残存コンクリや鉄筋断面や塑性化の有無、両サイドの鉄筋物性） ・質量（部材コンクリートを小割したり、脱落したりすることによる質量変化） したがって、このようなパラメータの経時的変化にロバストである必要がある。
R-2	大きく不確定でモデル化されていないノイズ源の存在	前述の建築構造分野では、特性がある程度既知な入力振動に対して解析を行う。しかし、RC解体工事では現地で発生する入力振動（ex.建設機械の振動）は、十分に調査・モデル化されている現状にない。また、仮に十分に調査しても、建設機械の接触や他の隣接する部材の解体作業に伴う振動など、法則化しにくい入力振動が予想される。したがって、このようなノイズに対してロバストである必要がある。
R-3	判定の即時性	本申請研究の最終目標とするシステムは、建設作業員への警報の発信を意図している。したがって、“転倒の兆候”は、振動の測定後、即時に行われる必要がある。システム同定の手法のいくつかは、中規模の行列計算を要求することになり、結果として、この即時性が失われる。
R-4	事故性の判別	本申請研究は「事故」の防止を目的としているが、技術自体は“部材の転倒の検出”を開発目標としている。ところが、解体工事自体が進捗すれば転倒は必ず行われるわけであり、“予期しない転倒”と“計画された転倒”を区別する必要がある。

表－2 解体工事の現地調査（対象建築物の概要）

項目	概要
建築年	1975 年
構造種別	鉄筋コンクリート造
階数	地上 9 階地下 1 階建て
建築面積,延床面積	716m ² , 7011m ²
解体工法	解上解体工法(対象部材は、重機により転倒する)

表－3 本報で用いた複合センサの概要

項目	概要
寸法, 質量	W37H46D12mm, 22g
サンプリング間隔	10ms
加速度レンジ	±16G
角速度レンジ	±2000dps



図－3 解体工事の実測の様子

4. 本報で解決しようとする課題

表－4に解体工事において転倒作業のモニタリングをおこなって部材の意図しない転倒を検知する場合に要求される性能を分類して示す。解体工事では、工事の進捗によって部材の諸元が変化する（R-1）ので、剛性・減衰・質量など、一般的な振動解析で必要な部材の諸元が不確定に変化するという特性がある。このため、解析にあたって

必要な情報が不足する。また、他の重機の振動などノイズが多く、地震動などのようにモデル化されていない振動入力である（R-2）ために、実験や解析によるモデルを開発しにくく、実構造物への適用性を検証しにくいという特性も指摘できる。

また、転倒の兆候を検知するという技術目標にも困難さがある。すなわち、部材が転倒する前に、しかも即時的に判定しなければならないので、異常検知判定のプログラムは、十分な判定速度を有していなければならない（R-3）。

さらに、そもそも転倒作業自体が部材を転倒させる目的で行われているので、「意図しない転倒」と意図している転倒を何らかの手法で判別する必要もある（R-4）例えば、図-4のように部材の傾斜角を解析すれば、部材が建築物に対して内外のいずれに倒れようとしているかによって判定できるが、例えば古典的な固有振動による判定では、このような判定は困難である。

本報では、このような分析を基に、機械学習による統計的なアプローチによって、特に R-1, R-2, R-3 の解決を念頭に開発をおこなった。

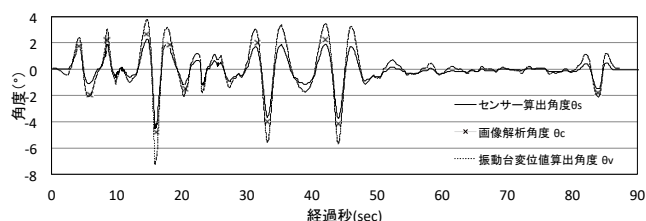


図-4 部材の傾斜角度を推定した結果
(文献6の成果を引用)

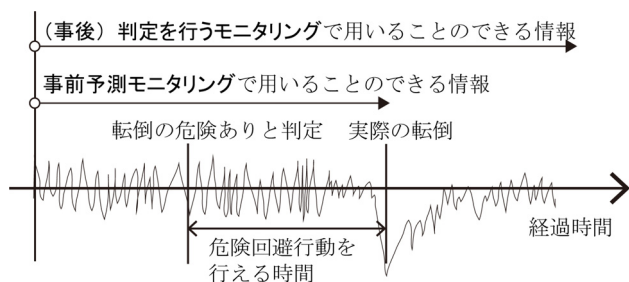


図-5 危険の予兆をモニタリングする場合の
データ分析上の制約(文献7より転載)

5. モデルの考え方と実解体工事データへの適用

5.1 機械学習の成功例からみた適切なモデル選定・構築

近年、各工学分野で応用が盛んなディープラーニングであるが、その成功例は、画像あるいは時系列データを対象としたものが大半である。本報の対象は、モニタリングによる時系列データであり、成功例に該当すると判断して、モデル選定に着手した。

5.2 モデルの概要と実測データへの適用

開発中であるので、モデルの詳細は割愛するが、本報では、LSTM⁸⁾、Adam⁹⁾、BPTT、Early stopping等の技法を使用して、ディープラーニングによる解体工事モニタリングの予測モデルを構築した。図-6にシステムのデータ入出力の概要を示す。転倒まで程遠い時間帯（すなわち危険性がほとんどない時間帯）には加速度入力に対する角速度応答が小さく、（剛性が低下すると）大きくなるとの考え方の基、応答の予測からの乖離によって転倒の兆候を掴もうというものである。

図-7は、工事前半を学習データとして、後半の工事データを予測した例、図-8は、学習データとは別の部材転倒作業に構築した学習器を適用した例である。いずれの場合

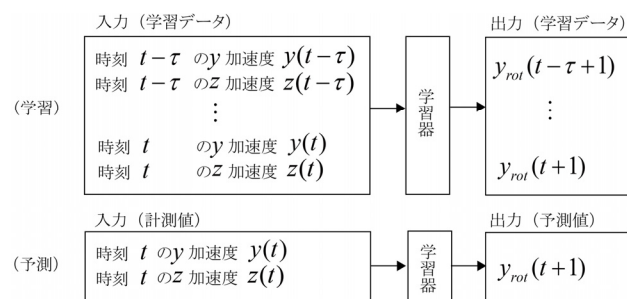


図-6 本報開発モデルにおける
学習・予測の入力・出力データ

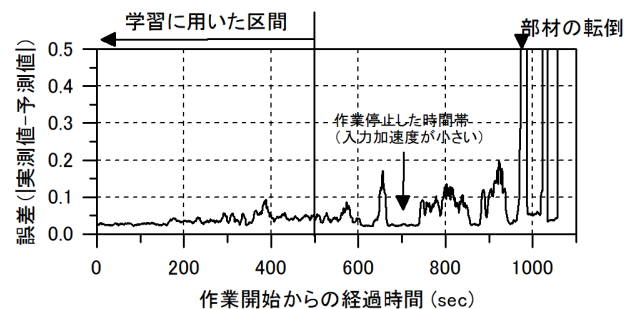


図-7 部材転倒の予兆に関する分析結果
(予測値からの乖離) ※学習データと同じ部材

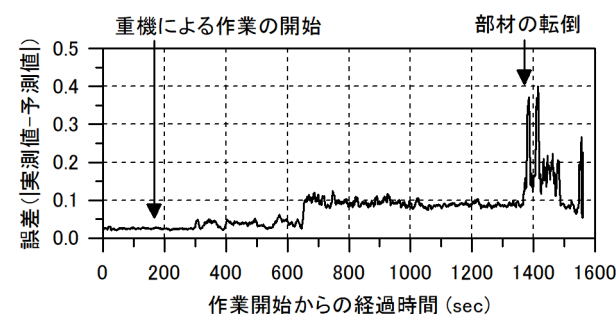


図-8 部材転倒の予兆に関する分析結果
(予測値からの乖離) ※学習データと異なる部材

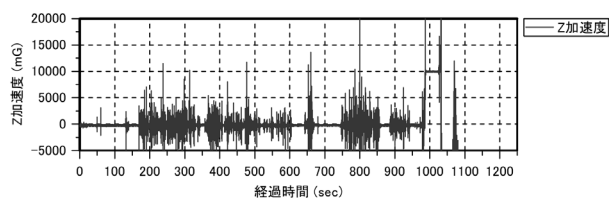
合も、予測値と実測値は、転倒が近づくと乖離し（すなわち、入力加速度に対する角速度応答が大きくなり）部材に変化が生じていることをある程度、定量的に判定出来ることが分かる。

5.3 学習したモデルの適用性の限界

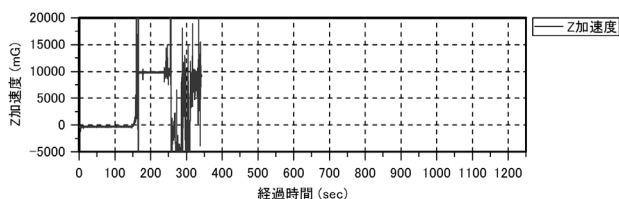
本報で開発したモデルは、異常検知性能に不十分な点があることが判明している。まず、図－7の結果をよく観察すると、予測値からの乖離が時折低下している。これは、重機が作業を停止した時間帯であり、入力加速度、出力角速度のいずれもゼロに近いために予測と合致している。このように作業モードによる違いを判定できていない。また、図－9に模擬 RC 部材の転倒作業実験の様子、図－10、図－11に加速度波形を実際の工事と比較して示す。工事手順としては同一となるように実施したにも関わらず、模擬解体工事作業では大幅に加速度波形等が異なり、結果として開発モデルでは異常を検知できなかった。機械学習が



図－9 解体工事を模擬した実大 RC 部材のモニタリング実験の様子



図－10 実際の解体工事振動データ
(部材面の法線方向加速度)



図－11 模擬解体工事の振動データ
(部材面の法線方向加速度)

統計的なアプローチであるために、このように特性の異なる部材では危険性をうまく予測できないものと考えられるが、統計的な手法であるためにモデルの改良が難しいということも指摘できる。

まとめ

本報では、解体工事における転倒作業を対象に、意図しない転倒の予兆を検知するシステムを、ディープラーニングによって構築する試みを紹介した。

謝辞

本報の成果は全国解体工事業連合会助成によるものである。現場計測にあたっては、名古屋市立大学・青木孝義先生の協力を得た。実大壁試験は、ものづくり大学・大塚秀三先生のご助力で実現したものである。宇都宮大学学生（佐山諒君、河村千秋さん、佐藤卓志君）には実験・調査にご協力いただいた。実地計測は、三同建設（株）の関係各位のご協力によって実現した。関係各位に心より感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建築物等の解体工事施工指針(案)同解説, p146, 解説図 4.6.3, 日本建築学会, 1998
- 2) 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修:建築物解体工事共通仕様書・同解説 平成 18 年度, p.90, 公共建築協会, 2006
- 3) まるごと「解体工事」NOW, pp107-190, 建築技術, 2011
- 4) 解体工法研究会:新・解体工法と積算, 2003
- 5) 建設業労働災害防止協会:コンクリート工作物解体工事の作業指針, 2010
- 6) 藤本郷史:解体工事を対象とした部材転倒作業モニタリングシステムの開発 - 小型試験体実験による計測精度に関する検討-, 第 38 回 日本建築学会 情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp124-132, 2015.12
- 7) Satoshi Fujimoto, Takayoshi Aoki: Measuring the inclination angle of Building walls under demolition works -selection of sensing method feasible for demolition works-, Proceedings of The 12th Korea/Japan Joint Symposium on Building Materials and Construction, Vol.11, pp.217-220, 2015.07 (in Japanese)
- 8) Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long Short-Term Memory. Neural Computation, 9(8), 1735-1780. <http://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- 9) Kingma, Diederik P., Ba, Jimmy: Adam: A Method for Stochastic Optimization, eprint arXiv:1412.6980

*1 宇都宮大学 地域デザイン科学部 准教授 博士（工学）